

LRFD에 의한 2경간 연속 강교량 주부재의 최적화 설계

Optimal Design of I-type Girder in 2 Span Continuous Steel Bridges by LRFD

국 중 식*
Gook, Joong-Sik

신 영 석**
Shin, Yung-Seok

ABSTRACT

In this study, I-type girders used as main members of a two span continuous steel bridge, are optimally designed by a Load and Resistance Factor Design method(LRFD) using an numerical optimization method. The width, height, web thickness and flange thickness of the main girder are set as design variables, and light weight design is attempted by choosing the cross-sectional area as an object function. The main program is coded with C++ and connected with optimization modul ADS, which is coded with FORTRAN. The results of the program show that the stress constraints of noncomposite section during the initial construction stage become active in the positive moment area and the service limit state constaints become active in the negative moment area.

1. 서 론

최근 새로이 소개 되고 있는 설계법인 LRFD는 하중의 종류에 따라 하중계수를 달리할 뿐만 아니라, 부재의 중요도에 따라 저항계수를 변화시켜준다. 이 계수들은 하중과 구조적 성능에 관한 현 시점에서의 통계적 지식에 근거한 신뢰도 이론으로부터 개발된 것이다. 따라서 기존의 허용응력설계법보다 합리적이고 재료를 훨씬 더 효과적으로 사용할 수 있는 설계 개념으로 인식되고 있다.

LRFD에 관한 연구 동향을 살펴보면 1990년 대 Adeli와 Phan에 의해서 AISC(American Institute of Steel Construction) 하중-저항계수 설계법(load and resistance factor design)에 근거한 용접 연결된 합성형 교량의 보강 강판형(welded stiffened steel plate girders) 설계자동화 프로그램이 개발되었고, 국내에서는 김영구⁽¹⁾가 합성형 보에서의 허용응력 설계법과 LRFD 설계법을 비교 연구하였으나 최적화 기법을 도입하지는 않았다. 안성욱⁽²⁾은 최적화 기법을 도입하여 단순지지 합성형 보에서의 허용응력 설계법과 LRFD 설계법을 비교 분석하였다. 최현, 윤동용⁽³⁾은 최적화 기법을 도입하여 조밀 단면과 비조밀 단면에 대해 수계산 및 허용응력 설계법 그리고 LRFD 등의 결과 단면을 비교 검토하였다. 그러나 1994년 AASHTO에서 LRFD Specification을 제정하여 국내에 도입된 후 AASHTO의 LRFD에 근거한 설계 자동화 프로그램은 아직 초보적인 단계에 머무르고 있는 실정이다. LRFD설계법을 설계에 적용 시 보다 효율적인 설계를 위하여 본 프로그램을 작성하게 되었으며, LRFD설계법에 따르는 보다 효율적인 단면을 얻어내기 위하여 최적화 설계를 도입하게 되었다. 1)

최적화 수행에 있어서는 ADS⁽⁴⁾프로그램 내의 Modified Method of Feasible Direction⁽⁵⁾⁽⁶⁾을 사용하였다.

*아주대학교 토목공학과 석사
**아주대학교 토목공학과 부교수

본 논문에서는 지간의 길이 변화에 따른 I형 거더의 단면 형상이 어떻게 변하는지와 설계에 영향을 미치는 제약조건들을 비교 분석하였다.

2. 설계에 사용된 교량의 모델

설계에 사용된 교량은 2경간 연속 교량으로써 합성형 I거더를 병렬로 배치하였다. 가로보의 배치는 I형 거더의 횡좌굴에 저항할 수 있도록 도로교시방서의 규정을 따라서 정모멘트 구간과 부모멘트 구간으로 나누어 등간격으로 배치하였다.

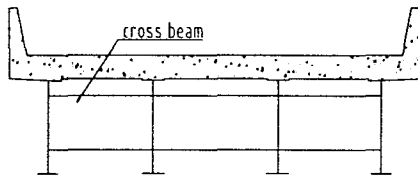


그림 2.1 교량의 단면도

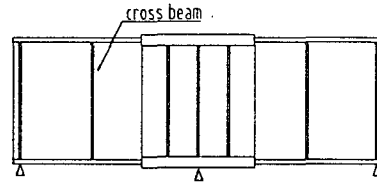


그림 2.2 횡단면도

구조용 강재로는 SWS490을 적용하였고 콘크리트는 압축강도 280kg/cm^2 , 탄성계수비는 8로 가정하였다. 주형은 수평보강재가 없고 정모멘트 구간의 웹과 부모멘트 구간의 웹 높이를 같도록 하였으며, 1등급 교량을 기준으로 설계하중을 정하였다.

3. 설계 및 제약 조건

교량의 설계는 도로교표준시방서(1996)(부록)하중-저항계수 설계편⁽⁷⁾의 규정에 따랐으며, 그림3.1과 같은 순서도에 의거하여 설계 전과정을 프로그램하였다.

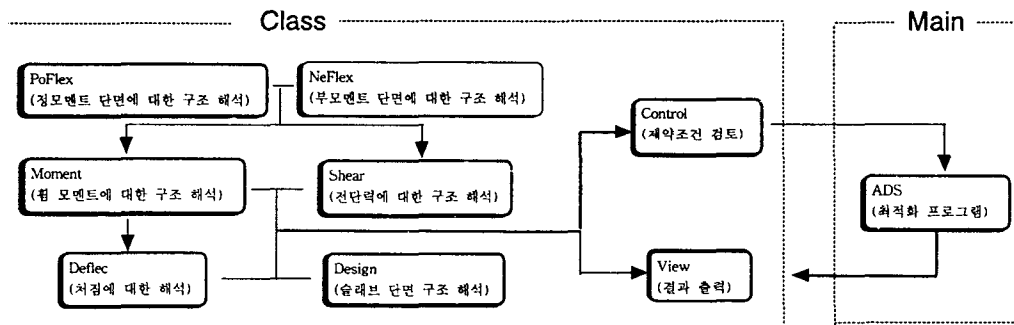


그림 3.1 프로그램 개요

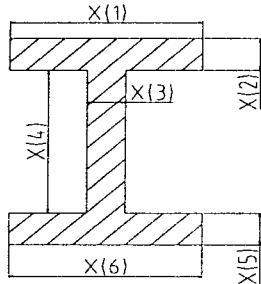


그림 3.2 설계변수

본 연구에서는 그림 3.2에 나타난 바와 같이 I형 거더의 상·하부 플랜지의 폭과 두께 및 복부재의 높이와 두께를 설계 변수로 두었으며, 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에서 설계 변수의 설정은 같으나, 부모멘트 구간에서는 정모멘트 구간 복부재의 높이와 같도록 제한하였다.

또한 구조용 강재의 중량을 최소화하여 경제적인 시공을 할 수 있도록 부재의 단면적을 설계목적함수로 설정하였다.

$$\text{Objective Function} : X(1) \times X(2) + X(3) \times X(4) + X(5) \times X(6)$$

본 논문에서는 도로교표준시방서(1996) “하중-저항계수 설계편”⁽¹⁾에 근거하여 제약조건을 선정하였으며, 정모멘트 구간 설계에 대한 제약조건(총 16개)과 부모멘트 구간 설계에 대한 제약조건(총 17개)으로 나누어 구분하였다. 정모멘트 구간과 부모멘트 구간에서의 제약조건은 아래의 표 3.1과 3.2에 나타나 있다.

표 3.1 정모멘트 구간의 제약 조건

제약조건	내 용
G(1)	연성규정으로써 파괴시 강재에 의한 연성파괴를 유도한다.
G(2)	복부재의 세장비 조건.
G(3)	극한 모멘트가 설계모멘트보다 크도록 규정.
G(4)	압축플랜지의 단면 2차모멘트 비 상한값 (0.1:1)
G(5)	압축플랜지의 단면 2차 비 하한값 (0.9:1)
G(6)	극한 전단력에 대한 격려 범위 검토.
G(7)	극한 전단력이 설계전단력보다 크도록 규정.
G(8)	하부 플랜지 함복에 대한 검토.
G(9)	휨에 대한 피로 검토.
G(10)	구조물의 허용 처짐 검토.
G(11)	인장플랜지의 피로 검토.
G(12)	시공 중인 구조물에 대한 복부재의 세장비 검토.
G(13)	시공 중인 구조물에 대한 압축플랜지의 세장비 검토.
G(14)	횡좌굴에 대한 기르보 설치의 적격 여부 검토.
G(15)	횡방향 휨지지 길이에 따른 복부재의 세장비 제약조건.
G(16)	압축플랜지 브레이싱 검토.

표 3.2 부모멘트 구간의 제약 조건

제약조건	내 용
G(1)	복부재의 세장비 조건.
G(2)	압축플랜지의 세장비 조건.
G(2)	압축플랜지의 브레이싱에 대한 검토.
G(3)	복부의 폭두께비와 압축플랜지의 세장비가 둘 다 0.75를 넘을 경우 세장비 조정.
G(4)	압축플랜지의 단면 2차 모멘트 비의 하한값(0.1:1)
G(5)	압축플랜지의 단면 2차 모멘트 비의 상한값(0.9:1)
G(6)	극한 모멘트가 설계 모멘트보다 크도록 규정.
G(7)	극한 전단력의 하한 경계 검토.
G(8)	극한 전단력의 상한 경계 검토.
G(9)	극한 전단력은 설계 전단력보다 크도록 규정.
G(10)	상부플랜지 전단연결재의 함복에 대한 재료 특성 검토.
G(11)	인장플랜지의 하중집중점 보강재, 연결판의 재료 특성 검토.
G(12)	종방향 철근의 인장 용력 검토.
G(13)	복부에서의 피로 검토를 만족하기 위한 조건 검토.
G(14)	복부에서의 피로 검토.
G(15)	압축 플랜지가 인장 플랜지보다 단면이 큰지에 대한 검토.
G(16)	압축 플랜지의 사용성한계상태조합Ⅱ에 대한 검토.
G(17)	인장 플랜지의 사용성한계상태조합Ⅱ에 대한 검토.

본 연구에서 각각의 제약 조건은 합성 전 응력에 대한 검토와 합성 후 응력에 대한 검토를 모두 하였으며, 사용된 하중 조합은 다음과 같다.

- 1) 강도한계상태조합 I - 일반적인 차량통행을 고려한 기본하중조합. 이 때 풍하중은 고려하지 않는다.
- 2) 강도한계상태조합 IV - 활하중에 비하여 사하중이 매우 큰 경우에 적용하는 하중조합.
- 3) 사용성한계상태조합 II - 차량 하중에 의한 강구조물의 함복에 대한 하중조합.

4. 최적 설계 결과 및 분석

4.1 프로그램의 수렴성

국부 최적점의 존재 여부와 최적 단면으로의 수렴성을 검토하기 위하여 몇 개의 시단면으로 최적 설계가 시도되었으며, 이들의 동일성을 비교 분석을 통해 검증하였다.

부모멘트 구간에서는 최적화 과정에서 정모멘트 구간과의 복부 높이가 다르게 나타나지 않도록 복부의 높이를 제한하였다. 따라서 다음의 부모멘트 최적화 단면은 정모멘트 구간의 최적단면에 따라 제한을 받는 단면이다. 그림 4.1과 4.2에서는 지간을 30m로 고정하여 3가지의 다른 시단면의 최적 설계 결과를 보여주고 있다.

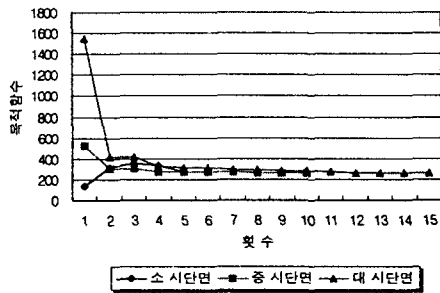


그림 4.1 정모멘트 구간에서의 최적화 수렴 과정

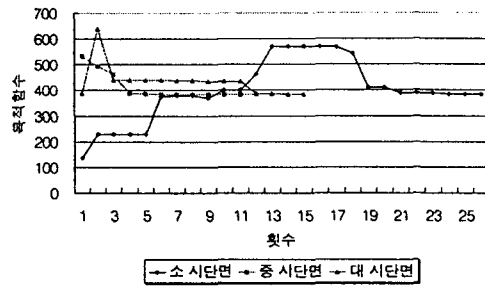


그림 4.2 부모멘트 구간에서의 최적화 수렴 과정

정모멘트 구간에서의 목적함수의 차이는 최적 수렴 값에서 1%이내를 가지나, 정모멘트 구간에서 중점적으로 검토되는 하부 플랜지에서는 폭과 두께의 차이에 따라 다른 부분보다 큰 범위의 차(0.1%~4%)를 보였다. 부모멘트 구간에서의 목적함수의 차이는 1%이내 이나, 플랜지의 폭이나 두께 등 단면의 차이는 정모멘트 구간에서 보다 크게(0.1%~8%) 나타났다.

4.2 지간의 변화에 따른 최적 단면적

지간의 변화에 따른 제약 조건의 활성화를 검토하기 위하여 25m에서 60m의 구간을 5m 단위로 변화하여 최적 설계를 시도하였으며, 사용된 지간은 I형 거더가 Box형 거더보다 유리한 길이 범위(60m이하)로 설정된 것이다. 지간의 변화에 따른 주형의 단면 변화는 정모멘트 구간과 부모멘트 구간으로 나누어 비교하였고, 다음으로 주형의 각 부위별 치수를 비교하였다. 그림 4.3은 지간의 변화에 따른 단면의 변화를 나타낸 것이다.

지간 길이에 따라서 사하중 및 활하중에 의한 극한모멘트가 급격히 증가하며, 이에 대한 설계모멘트 또한 증가하게 된다. 따라서, 단면 2차 모멘트를 증가시키기 위하여 복부의 높이를 증가시키게 되는데, 복부의 높이가 커짐에 따라서 복부의 두께, 플랜지의 폭 및 두께 또한 증가하여 결과적으로 I형 거더의 단면이 커지게 되는 것이다.

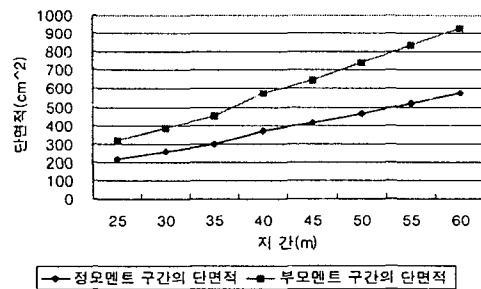


그림 4.3 지간 변화에 따른 구간별 단면적

최적화 설계 결과 정모멘트 구간에서는 G(5), G(11), G(13), G(15), G(16)의 제약 조건이 활성화되었고, 부모멘트 구간에서는 G(1), G(6), G(8), G(16), G(17)의 제약 조건이 활성화되고 있다. 위의 내용을 아래의 표4.1에 나타내었다.

표 4.1 지간에 따른 최적 설계 결과

지간 (m)	정모멘트 단면		부모멘트 단면	
	강제의 총 단면적(cm ²)	활성화 제약 조건	강제의 총 단면적(cm ²)	활성화 제약 조건
25	209.01	11,13,15,16	305.82	1,16,17
30	257.76	11,13,15,16	383.89	8,16,17
35	307.51	11,13,15,16	468.17	8,16,17
40	359.26	11,13,15,16	556.38	8,16,17
45	412.12	11,13,15,16	647.18	6,8,16,17
50	465.49	11,13,15,16	739.97	6,8,16,17
55	520.43	5,11,13,15, 16	834.77	6,8,16,17
60	577.27	5,11,13,15, 16	930.08	6,8,16,17

4.3 정모멘트 구간에서의 활성화 제약 조건

G(5) : 압축플랜지와 전체 단면의 연직축으로의 단면 2차 모멘트의 최소비(0.1:1)

G(11) : 인장 플랜지 피로 검토

<비합성 상태의 응력 검토>

G(13) : 압축플랜지 폭두께 비

G(15) : 복부의 폭두께 비

G(16) : 압축플랜지 비지지 길이에 따른 극한 모멘트의 설계모멘트에 대한 검토

정모멘트 구간에서 인장플랜지의 단면 결정은 응력에 의하여 많은 영향을 받게 된다. 모든 지간의 정모멘트 구간에서 G(11)의 제약 조건이 활성화 된 것을 알 수 있다.

G(13),G(15),G(16)은 시공 중 비합성 거동 상태에서 주형에 작용하는 응력이 시공 후 합성 거동 상태의 응력보다 더 불리해 질 수 있기 때문에 비합성 상태의 응력 검토에 대한 제약조건이 활성화 되는 것이다.

지간 55m부터는 G(5)의 제약 조건이 활성화되는데, 이는 지간이 길어짐에 따라서 하부의 플랜지 폭은 증가를 하게 된다. 아래 그림에서 보는 바와 같이 상부플랜지 폭의 증가량보다는 하부플랜지 폭의 증가량이 더 큼을 알 수 있다. 따라서 압축플랜지 단면 2차 모멘트의 증가량보다 약축에 대한 단면2차모멘트의 증가량이 더 커지게 됨에 따라서 단면 2차 모멘트 비의 하한 값에 걸리기 때문인 것이다.

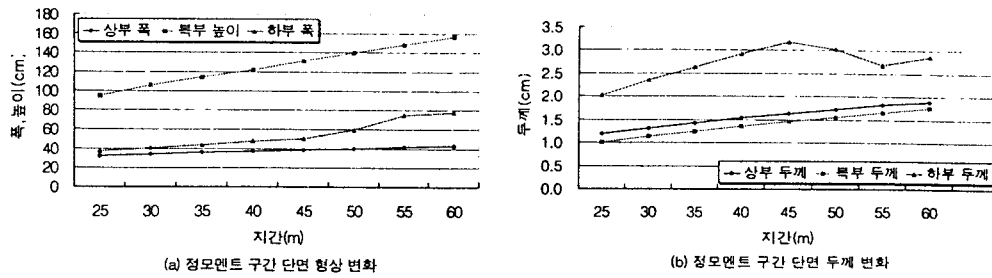


그림 4.4 정모멘트 구간 단면 변화

4.4 부모멘트 구간에서의 활성화 제약 조건

- G(1) : 복부의 폭두께 비
- G(6) : 극한모멘트 \geq 설계모멘트
- G(8) : 극한전단력의 상한값
- G(16) : 압축플랜지의 강도한계상태조합II에 의한 응력 검토
- G(17) : 인장플랜지의 강도한계상태조합II에 의한 응력 검토

G(1), G(8)은 최적화 할 때, 복부의 높이를 제한함으로써 제약 조건이 활성화 되었다.

G(6)은 부모멘트구간의 활하중 모멘트나 사하중 모멘트의 값이 정모멘트보다 크게 나타났고, 또 정모멘트 구간의 복부 높이와 같게 해 주기 위하여 복부의 높이를 제한함으로써 단면 변화를 제한하게 되는데, 이는 극한모멘트의 증가를 일정정도 내에서 제한하는 의미가 있다. 따라서 G(6)가 활성화 되었다.

G(16)은 하부 플랜지단면에 불리하게 작용하는 한계상태인 사용성한계상태조합II에 의한 응력보다 큰 단면을 가지기 위하여 활성화되는 것으로 판단되고, G(17)은 인장플랜지의 단면이 사용성한계상태 조합II에 의한 응력보다 큰 단면을 가지기 위하여 활성화되는 것으로 판단된다.

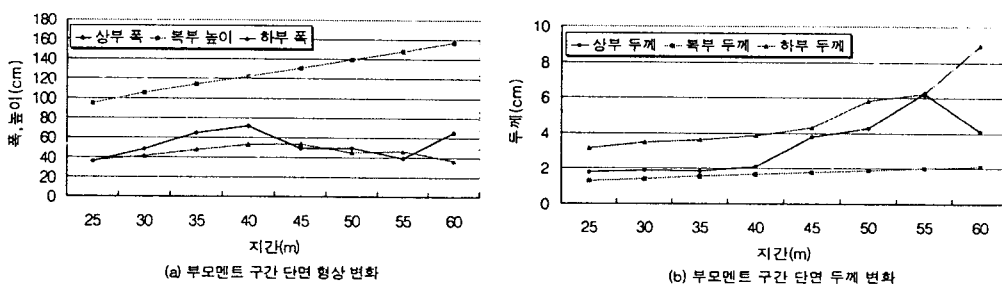


그림 4.5 부모멘트 구간 단면 변화

4.5 지간 길이에 따른 단면의 최적 형상(단 위 : cm)

힘에 저항하기 위해서는 강재의 단면 2차 모멘트를 증가시켜 주어야 한다. 강축에 대한 단면 2 차 모멘트를 증가시켜 주기 위하여 복부의 높이가 증가하게 된다. 이는 I형 단면에 있어 강축에 대한 단 면 2 차모멘트를 키워주기 위해서는 복부의 높이를 늘이는 것이 효과적이기 때문이다.

복부의 높이가 높아질수록 강재에는 횡좌굴의 영향이 커지게 되는데, 이 횡좌굴에 저항하기 위하여 플랜지의 폭이 늘어나게 된다.

표 4.2 지간 길이에 따른 단면 치수

지간 (m)	정모멘트 단면						부모멘트 단면					
	상부플 랜지 폭	상부플 랜지 두께	복부 두께	복부 높이	하부플 랜지 폭	하부플 랜지 두께	상부플 랜지 폭	상부플 랜지 두께	복부 두께	복부 높이	하부플 랜지 폭	하부플 랜지 두께
25	32.23	1.189	1.004	94.79	37.31	2.023	36.44	1.7823	1.3199	94.788	36.767	3.1486
30	34.03	1.307	1.13	105.4	40.39	2.337	48.219	1.886	1.4256	105.37	41.315	3.455
35	35.67	1.42	1.24	114.3	43.65	2.628	64.68	1.846	1.5468	114.33	47.47	3.62
40	37.1	1.53	1.35	122.2	47.34	2.91	71.787	2.104	1.65	122.16	52.976	3.84
45	38.46	1.62	1.456	131.0	50.16	3.17	48.9	3.766	1.77	130.98	53.412	4.323
50	40.09	1.72	1.55	139.5	59.47	3.022	49.9	4.27	1.887	139.5	45.143	5.83
55	41.72	1.817	1.6478	147.7	75.19	2.676	39.58	6.27	1.998	147.72	46.7	6.2365
60	42.8	1.887	1.753	156.7	77.46	2.86	65.47	4.0885	2.1199	156.69	36.94	8.94

5. 결론

본 연구에서는 2경간 연속 강교량의 주부재를 대상으로 LRFD 설계 방식에 따라 최적화를 수행하 여 임의 지간에서 최적 단면을 찾아내기 위한 과정이 검토되었다. 지간의 길이를 변화시켜 주부재의 최적화 단면을 산출하였으며, 연구 결과로 산출된 최적화 설계 단면의 경향을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

I형 거더의 단면적 증가를 보면 정모멘트 구간은 12 ~ 16% 정도의 증가량을 가지고 증가하며, 부 모멘트 구간은 14 ~ 19% 정도의 증가량을 가지고 증가하는데, 부모멘트구간의 단면적이 정모멘트구 간의 단면적보다 클 뿐만아니라 단면적의 증가도 큰 것으로 나타났다.

정모멘트 구간 중간 지간(25m~50m)에서는 인장 플랜지 피로 검토, 압축플랜지 폭두께 비, 복부의 폭두께 비, 압축플랜지의 비지지 길이에 따른 극한 모멘트에 대한 검토 등의 제약 조건이 활성화 되 었다. 이는 정모멘트 구간 주형의 설계가 피로 응력 및 주형의 비합성 단면에 대한 응력 상태에 따라 서 설계단면이 결정되어지기 때문이다.

장지간(55m 이상)인 경우에는 압축플랜지와 전체 단면의 연직축으로의 단면 2차 모멘트의 최소비 (G(5))의 제약 조건이 활성화되었는데, 이는 장지간으로 가면 소성중립축이 콘크리트 내부에서 압축플 랜지 내부로 이동하게 되고, 이로 인하여 인장플랜지의 두께는 얇아 지고 폭은 늘어나게 되는 것이다.

부모멘트구간은 복부 높이에 제한을 줌으로서 복부의 폭두께, 극한모멘트와 설계모멘트에 대한 검토, 극한 전단력 상한값 등에 대한 제약 조건이 활성화 되었고, 복부 높이의 제한에 의하여 압축플랜지의 사용성 한계상태 조합Ⅱ 등의 제약 조건이 활성화 되었다. 또한 설계 변수가 정모멘트 구간보다 줄어들어 활성화된 제약 조건 수도 정모멘트 구간에 비해 부모멘트 구간에서는 줄어들었다.

LRFD 설계 규정에서는 부모멘트 구간에서 강도 한계상태, 피로 및 파괴 한계상태 그리고 사용성 한계상태와 같은 한계상태에 대하여 검토하도록 되어 있다. 본 연구에서와 같이 정모멘트구간 단면에 의하여 복부 높이의 제한이 설정된 부모멘트 단면에서는 위에서 언급한 강도 한계상태와 사용성 한계상태에 대해 제약조건이 활성화 되는 것으로 나타났다. 따라서 교량설계 시 이들 제약조건에 대하여 특별한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

6.참고 문헌

1. 김 영 구, "합성보에서 허용응력 설계법과 하중-저항계수 설계법의 비교연구", 홍익대 석사 문헌
2. 안 성 옥, "하중-저항계수 설계법에 의한 강교량주부재의 최적화설계 프로그램 개발보고서", 아주대 석사 문헌 1998
3. 최 현, 윤 동 용, "하중-저항 설계방법에 의한 합성 I형 교량의 설계 자동화 프로그램 개발" 동국대 박사 문헌 1998
4. Vanderplaats, G. N. (1984) "ADS-a Fortran Program for Automated Design Synthesis Version 1.10", NASA CR 172460.
5. Garret N. Vanderplaats, "Numerical Optimization Techniques For Engineering Design", Mc Graw-Hill Book Company, 1984.
6. Singiresu.S. Rao, "Engineering Optimization Theory and Practice", John Wiley & Sons .Inc.,1996
7. "도로교표준시방서(부록) 하중-저항계수 설계편", 건설교통부, pp.1-1 - 4-172, 1996.
5. W. F. Chen and Seung-Eock Kim, " LRFD Steel Design using Advanced Analysis", CRC Press, pp.385-399
6. Thomas Burns, "Structural Steel Design - LRFD ", Delmar Publishers